



УДК 538.945

Статья

## Трёхфазное выпрямительное устройство с криогенным охлаждением для перспективных сверхпроводниковых систем электроснабжения

А. О. Алексеев<sup>1,\*</sup>, Д. М. Шишов<sup>1</sup>, Д. А. Шевцов<sup>1</sup>, К. Л. Ковалёв<sup>1</sup>, В. Т. Пенкин<sup>1</sup>,  
В. А. Жуков<sup>1</sup>, Н. А. Родионов<sup>1</sup>, И. В. Лукошин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, 125993, Москва, Россия

\* e-mail: aleksey.0212@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.12.25, после переработки 10.12.25, принята к публикации 15.12.25.

Системы электроснабжения перспективной авиационной концепции полностью электрифицированного самолета предполагают совместную работу как высокотемпературно сверхпроводниковых (ВТСП) электрических машин и кабелей, так и силовых полупроводниковых преобразователей электроэнергии. Современные ВТСП материалы принципиально требуют их охлаждения до критических температур, достигаемых при помощи криогенного охлаждения. В этой связи целесообразно исследовать использование последнего для охлаждения силовых полупроводниковых компонентов, входящих в состав силовых каскадов преобразователей электроэнергии. Данная работа посвящена разработке прототипа управляемого трёхфазного выпрямительного устройства с криогенным охлаждением силового преобразовательного каскада. Выпрямительное устройство строится как корректор коэффициента мощности с целью выполнения требований к качеству электроэнергии, предъявляемых авиационными стандартами. Проведен сравнительный анализ различных структур силовых преобразовательных каскадов, исследованы обеспечиваемые ими показатели качества потребляемой электроэнергии и выбрана рациональная структура для данного применения. Продемонстрированы результаты имитационного компьютерного моделирования и выполненных экспериментальных исследований в условиях криогенного охлаждения.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП); криогенное охлаждение; криогенная электроника; перспективная авиационная система электроснабжения; трёхфазное выпрямительное устройство; коррекция коэффициента мощности, силовой каскад.

DOI: 10.62539/2949-5644-2025-9-4-84-96

### 1. Введение

Концепции полностью электрифицированных воздушных судов предусматривают интеграцию высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) устройств в состав бортового оборудования [1–3]. Предполагается, что применение ВТСП-технологий позволит обеспечить удельные массогабаритные характеристики, существенно превосходящие показатели традиционных электротехнических решений. В то же время функционирование ВТСП-устройств в структуре бортовой системы электроснабжения (СЭС) по-прежнему требует использования полупроводниковых преобразователей электрической энергии. В качестве одного из перспективных направлений построения СЭС рассматривается формирование каналов постоянного тока повышенного напряжения на базе ВТСП трёхфазного магнитоэлектрического генератора (МЭГ), функционирующего совместно с управляемым полупроводниковым выпрямителем, силовой каскад которого размещается в криогенной среде. Использование криогенного охлаждения, являющегося принципиально необходимым условием работы ВТСП-устройств, потенциально способствует повышению энергетической эффективности полупроводникового преобразователя [4–5]. Кроме того, такой подход позволяет отказаться от применения дополнительных хладагентов на борту воздушного судна.

Выпрямительное устройство реализуется по схеме трёхфазного корректора коэффи-

циента мощности (ККМ), что обеспечивает повышение коэффициента мощности, снижение коэффициента гармонических искажений потребляемого тока, а также уменьшение тока в нейтрали. Необходимость применения данной топологии обусловлена, во-первых, требованиями к качеству электрической энергии, предъявляемыми к авиационным СЭС. Во-вторых, результаты ранее выполненных исследований [6–7] свидетельствуют о том, что снижение уровня гармонических искажений переменного тока приводит к уменьшению потерь в ВТСП-катушках, лежащих в основе обмоток ВТСП электрических машин и, как следствие, к повышению общей энергетической эффективности системы.

Структурная схема канала генерирования электроэнергии перспективной сверхпроводниковой СЭС показана на рис. 1.

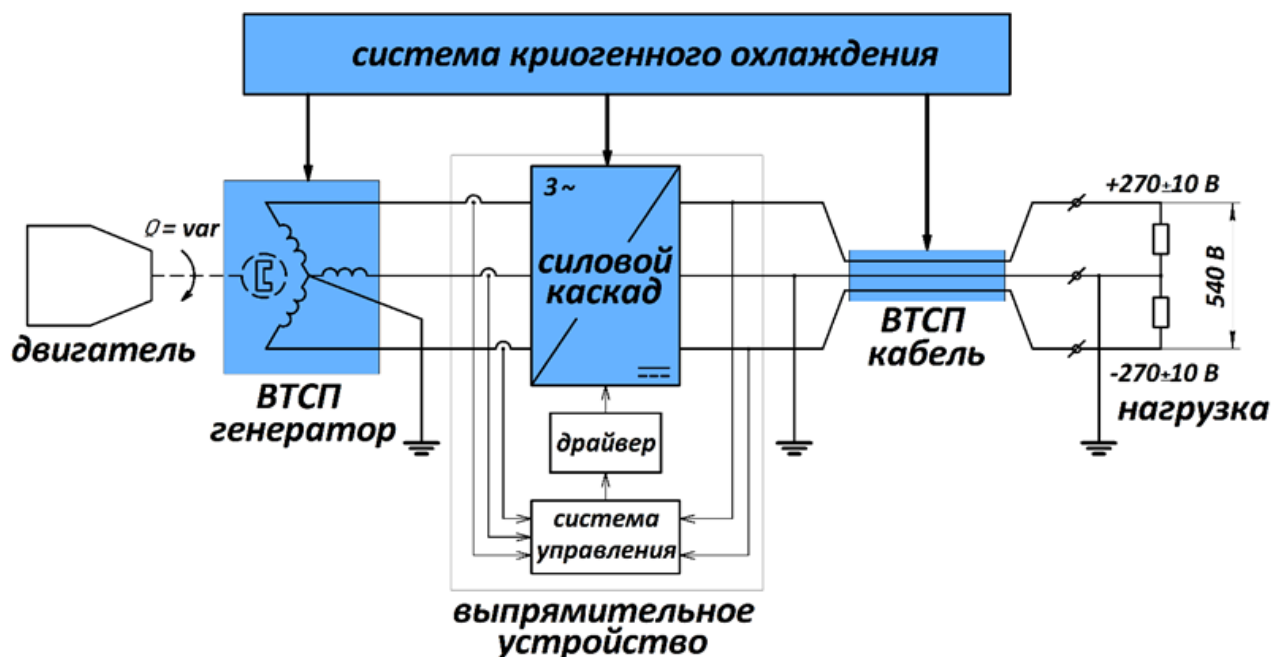


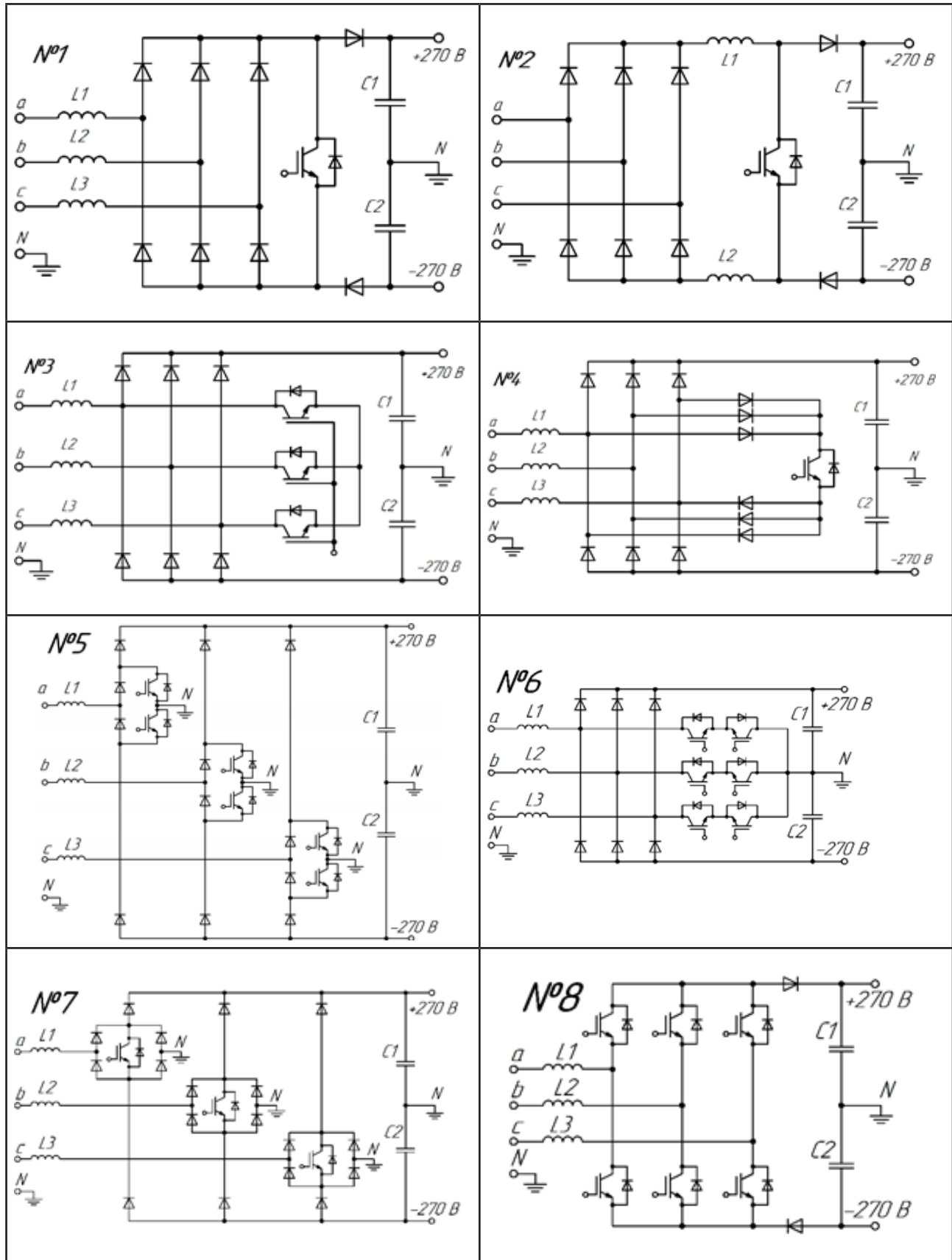
Рис. 1. Структурная схема канала генерирования электроэнергии перспективной сверхпроводниковой СЭС.

Силовая часть выпрямительного устройства строится на основе силового каскада, входного трехфазного дросселя и выходных сглаживающих конденсаторов звена постоянного тока. Роль входного дросселя при достаточной величине индуктивности может выполнять обмотка ВТСП-генератора. Управление осуществляется системой управления, которая в данном случае строится как замкнутая система с подчиненным регулированием. Криогенное охлаждение ВТСП генератора и силового каскада подразумевается осуществлять при помощи единого замкнутого контура системы криогенного охлаждения на борту. Звено постоянного тока имеет выходное напряжение номиналом 540 В ( $\pm 270$  В относительно нейтрали) в соответствии с современными тенденциями развития перспективных авиационных СЭС [8–11].

### 1.1 Сравнительный анализ структур силовых каскадов

Трехфазные управляемые выпрямители с функцией коррекции коэффициента мощности классифицируются в зависимости от принципа построения системы управления, которая может реализовывать либо совместное регулирование токов всех трех фаз, либо раздельное управление током каждой фазы. Существует значительное разнообразие структур силовых каскадов подобных устройств [12–13]. При проведении сопоставительного анализа для выбора рациональной структуры силового каскада был выбран ряд известных структур, предназначенных для работы с совместным управлением (№1–№4) и с раздельным управлением (№5–№8). Данные структуры силовых каскадов представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Структуры силовых каскадов.



Для каждой структуры была создана имитационная компьютерная модель и проведено моделирование, при помощи которого были оценены параметры качества потребляемой электроэнергии — коэффициент мощности, коэффициент гармоник потребляемых токов, коэффициент тока нейтрали (Таблица 2). Указанные величины были вычислены при помощи

выражений 1–3.

$$K_M = \frac{P_{av}}{S} = \frac{P_{av}}{U_{ph} I_{ph}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_{ph}(t) i_{ph}(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{ph}^2(t) dt} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_{ph}^2(t) dt}, \quad (1)$$

где  $K_M$  — коэффициент мощности;  $P_{av}$  — средняя активная мощность, Вт;  $S$  — полная мощность, ВА;  $U_{ph}$  — действующее значение фазного напряжения, В;  $I_{ph}$  — действующее значение тока фазы, А;  $i_{ph}$  — мгновенное значение тока фазы, А;  $u_{ph}$  — мгновенное значение напряжения фазы, В;  $T$  — период, с.

$$K_H = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $K_H$  — коэффициент гармоник, %;  $I_n$  — действующее значение тока  $n$ -ой гармоники, А.

$$K_N = \frac{I_N}{I_{ph}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_N^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{ph}^2(t) dt}}, \quad (3)$$

где  $K_N$  — коэффициент тока нейтрали;  $I_N$  — действующее значение тока нейтрали, А;  $I_{ph}$  — действующее значение тока фазы, А;  $i_N$  — мгновенное значение тока нейтрали, А;  $i_{ph}$  — мгновенное значение тока фазы, А.

В таблице также представлено количество силовых полупроводниковых компонентов, в частности, количество силовых транзисторов, а также количество дросселей.

**Таблица 2.** Количество силовых полупроводниковых компонентов дросселей в схемах силовых каскадов.

	Структура силового каскада							
	Совместное управление				Раздельное управление			
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
<b>Коэффициент мощности</b>	0.915	0.948	0.917	0.92	0.99	0.99	0.99	0.99
<b>Коэффициент гармоник, %</b>	6.65	8.62	7.41	7.0	2.77	2.71	2.87	2.58
<b>Коэффициент тока нейтрали</b>	0.03	0.082	0.03	0.029	0.074	0.062	0.071	0.049
<b>Количество силовых полупроводниковых компонентов</b>	9	9	9	13	18	12	21	8
<b>Количество силовых транзисторов</b>	1	1	3	1	6	6	3	6
<b>Количество дросселей</b>	3	2	3	3	3	3	3	3

Анализ результатов моделирования свидетельствует о том, что наилучшие параметры качества электроэнергии достигаются в структурах силовых каскадов с пофазным управлением. Основным недостатком таких структур является значительное количество силовых по-

лупроводниковых приборов, что приводит к усложнению конструкции преобразователя и затрудняет организацию криогенного охлаждения. С учетом данного недостатка для реализации экспериментального образца выпрямительного устройства была выбрана структура силового каскада №1 с совместным управлением, ключевое преимущество которой заключается в минимальном числе силовых полупроводниковых компонентов, в частности, в наличии лишь одного силового транзисторного ключа.

### 1.2. Разработка и компьютерное моделирование

Была разработана имитационная компьютерная модель выпрямительного устройства с функцией ККМ в среде Orcad Pspice. Для повышения эффективности преобразователь строится по принципу двухпоточного преобразования электроэнергии. Таким образом модель включает два идентичных силовых каскада, объединенных общей системой управления и защиты (СУЗ). Коммутация силовых транзисторов осуществляется с фазовым сдвигом, что позволяет увеличить эквивалентную частоту преобразования и снизить массо-габаритные параметры реактивных элементов. Разработанная имитационная компьютерная модель представлена на рис. 2.

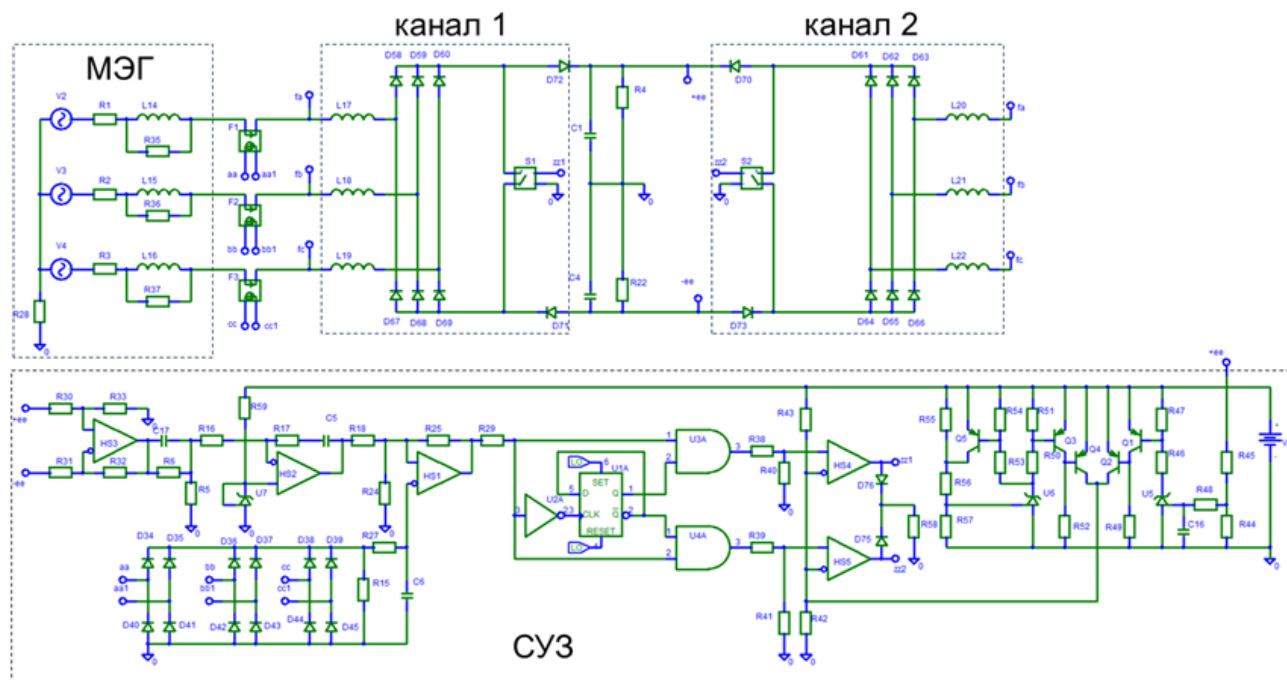


Рис. 2. Имитационная компьютерная модель выпрямительного устройства в среде Orcad Pspice.

Временные диаграммы электрических процессов, полученные по результатам компьютерного моделирования, представлены на рисунке 3.

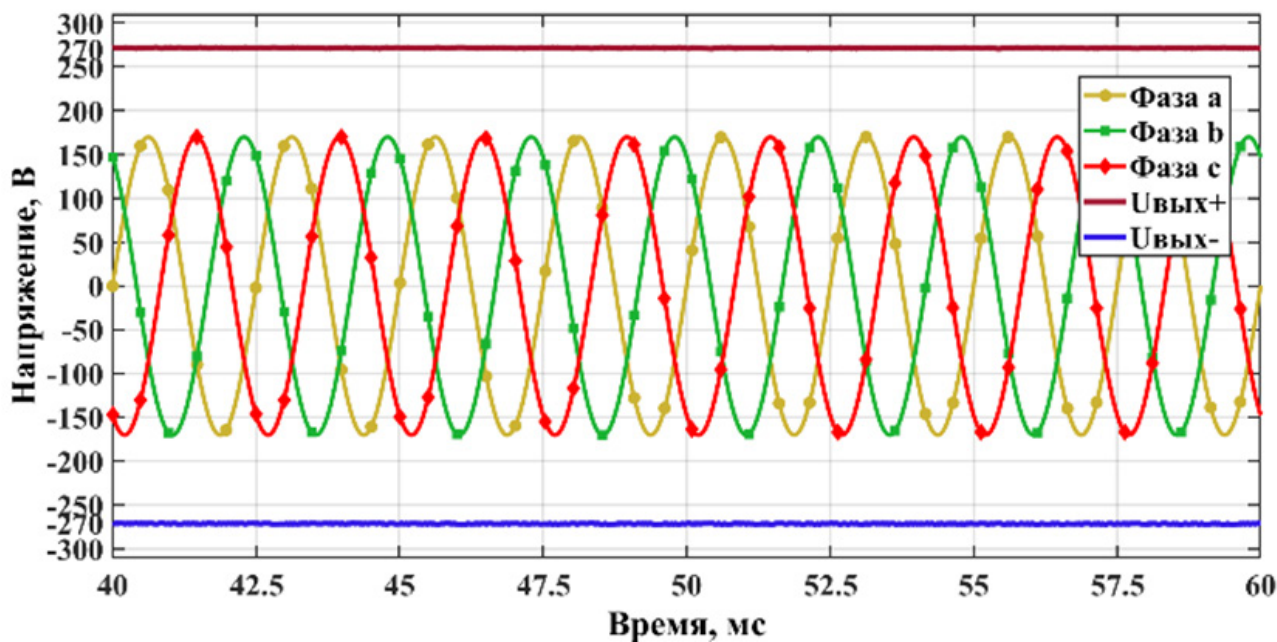
Графики, представленные на рисунке 3, свидетельствуют о близком фазовом совпадении фазных токов и напряжений, что обусловлено реализацией функции коррекции коэффициента мощности. Выходное двуполярное напряжение стабилизируется на уровне  $\pm 270$  В относительно нейтрали при уровне пульсаций не более 1%.

При разработке конструкции выпрямительного устройства был учтен ряд особенностей применения криогенного охлаждения в силовых электронных преобразователях:

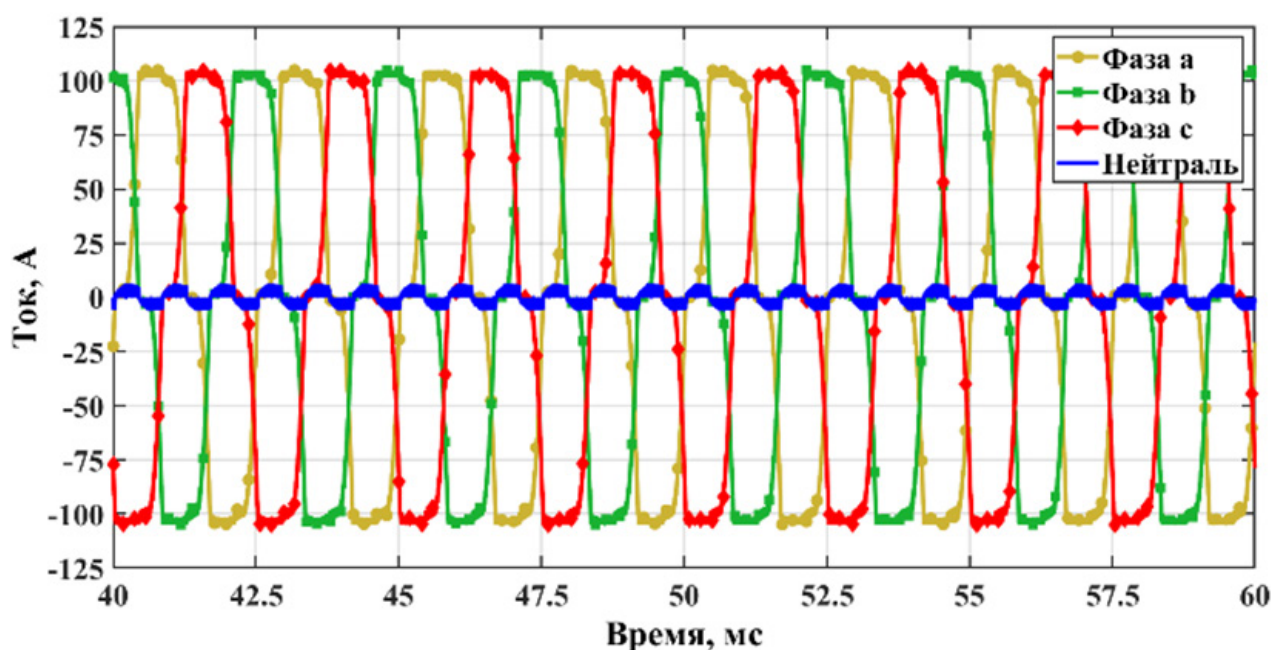
1. Необходимость использования полупроводниковых компонентов, изготовленных по технологии без заливки компаундом, поскольку низкие температуры вызывают его растрескивание [14].
2. Исключение электрического пробоя между силовыми шинами из-за конденсации влаги и образования инея, достигаемое за счет установки колпаков над силовыми каскадами

для создания разрежения воздуха внутри них.

3. Температурная чувствительность драйверов силовых транзисторных ключей; предполагается, что драйверы с трансформаторной или конденсаторной гальванической развязкой обеспечат более высокую надежность по сравнению с оптронными аналогами в криогенных условиях.



(а)



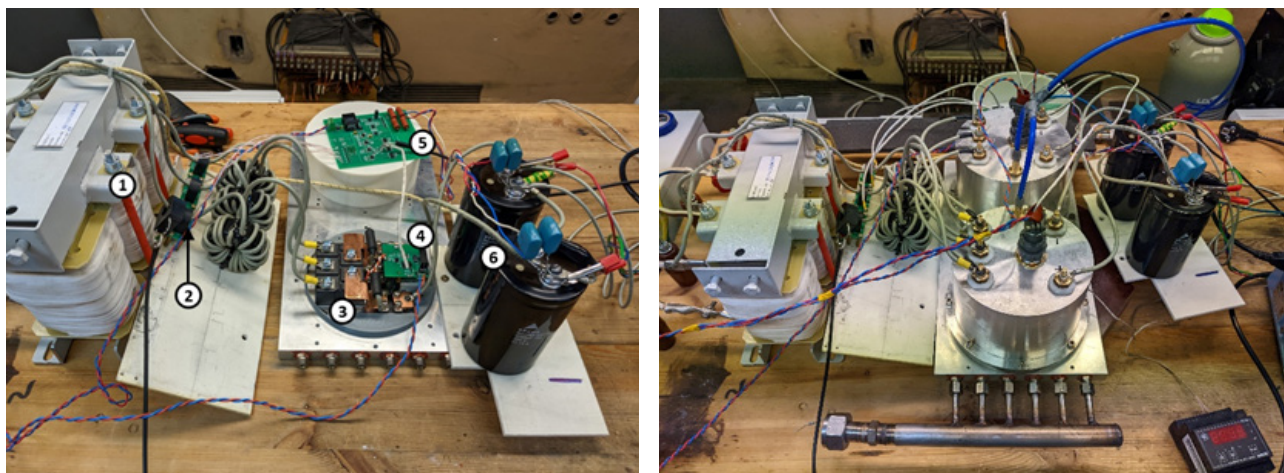
(б)

Рис. 3. Временные диаграммы электрических процессов в трехфазном выпрямительном устройстве с ККМ (а) — фазные напряжения и выходные постоянные напряжения, (б) — фазные токи и ток нейтрали.

Собранный экспериментальный образец трехфазного выпрямительного устройства с криогенным охлаждением показан на рисунке 4.

Силовые каскады реализованы на базе дискретных компонентов и включают диоды трехфазного выпрямительного моста, силовой транзисторный ключ, а также блокирующие

диоды. В экспериментальном образце преимущественно применены силовые модули VS-NFA140FA120 в корпусе SOT-227 [15]. Компоненты силовых каскадов размещены на общем радиаторе, интегрированном с системой криогенного охлаждения. Охлаждение обеспечивается прямым протоком жидкого азота через внутренние каналы радиатора.

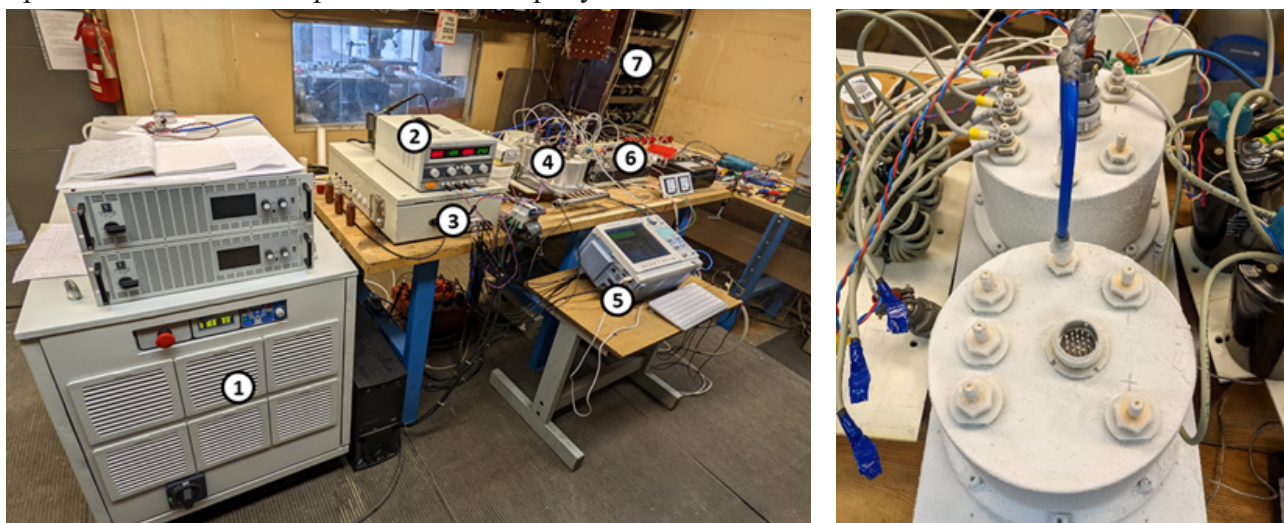


**Рис. 4.** Экспериментальный образец трехфазного выпрямительного устройства с криогенным охлаждением. Слева — перед установкой системы криогенного охлаждения. Справа — с установленной системой криогенного охлаждения.

На рисунке 4 приведены следующие обозначения: 1 — входной трехфазный дроссель; 2 — датчики фазных токов; 3 — силовой каскад; 4 — драйвер силового транзисторного ключа; 5 — система управления; 6 — выходные конденсаторы звена постоянного тока.

## 2. Экспериментальные исследования

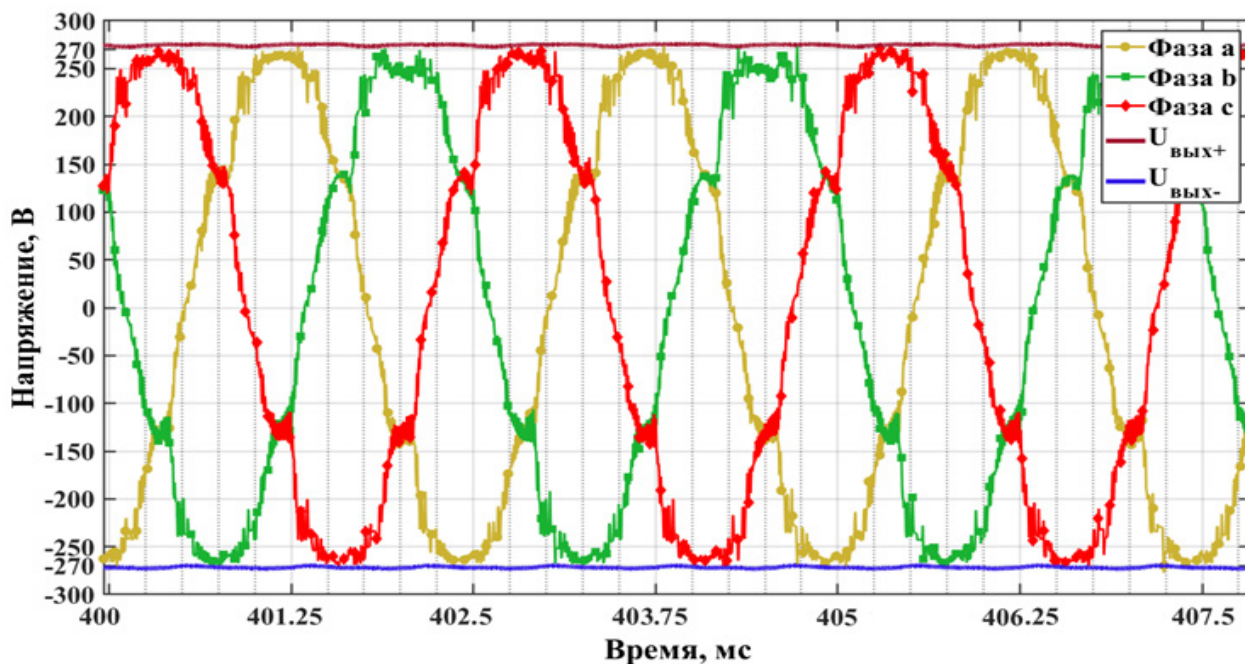
Экспериментальные исследования выпрямительного устройства проводились в режиме поэтапного криогенного охлаждения радиатора жидким азотом. Начальная температура поверхности радиатора, измеренная терморезисторным датчиком Pt100, составляла  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (298 К). При снижении температуры с шагом 25 К осуществлялось включение устройства, проверка работоспособности и фиксация электрических параметров с помощью системы сбора данных. Минимальная достигнутая температура составила  $-176\text{ }^{\circ}\text{C}$  (97 К), при которой подтверждена работоспособность преобразователя на мощности нагрузки 18 кВт. Экспериментальная установка для проведения криогенных испытаний и выпрямительное устройство в процессе испытаний представлены на рисунке 5.



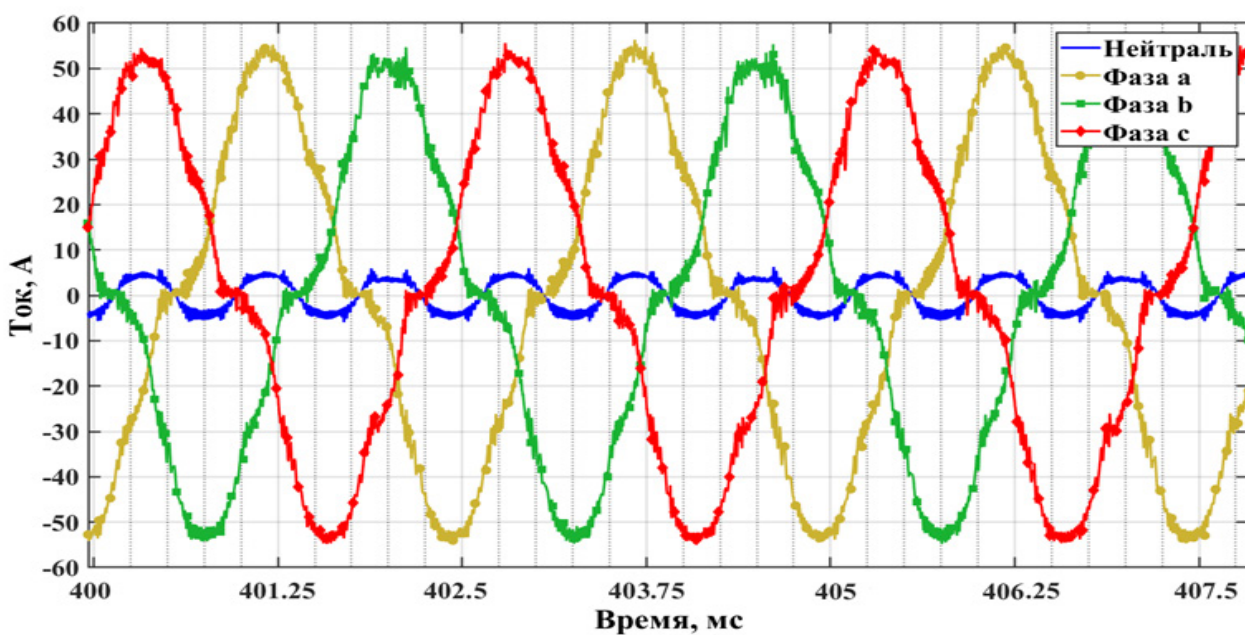
**Рис. 5.** Экспериментальная установка и экспериментальный образец при криогенных испытаниях. Слева — общий вид, справа — система криогенного охлаждения крупным планом.

На рисунке 5 приведены следующие обозначения: 1 — входной трехфазный лабораторный источник питания; 2 — вспомогательный лабораторный источник питания; 3 — блок измерений входных фазных токов и напряжений; 4 — экспериментальный образец; 5 — система сбора данных; 6 — блок измерений выходных постоянных токов и напряжений; 7 — нагрузка.

На рисунке 6 представлены временные диаграммы фазных напряжений и токов, тока нейтрали и выходного напряжения, построенные по данным эксперимента в установившемся режиме. Фазные напряжения демонстрируют близкое совпадение по фазе с токами, что обусловлено работой функции ККМ. Выходные напряжения стабилизируются на заданном номинальном уровне  $\pm 270$  В. При выходной мощности 18 кВт усредненный по трем фазам коэффициент мощности составил 0.97, а коэффициент гармоник потребляемых фазных токов — 7.3%.



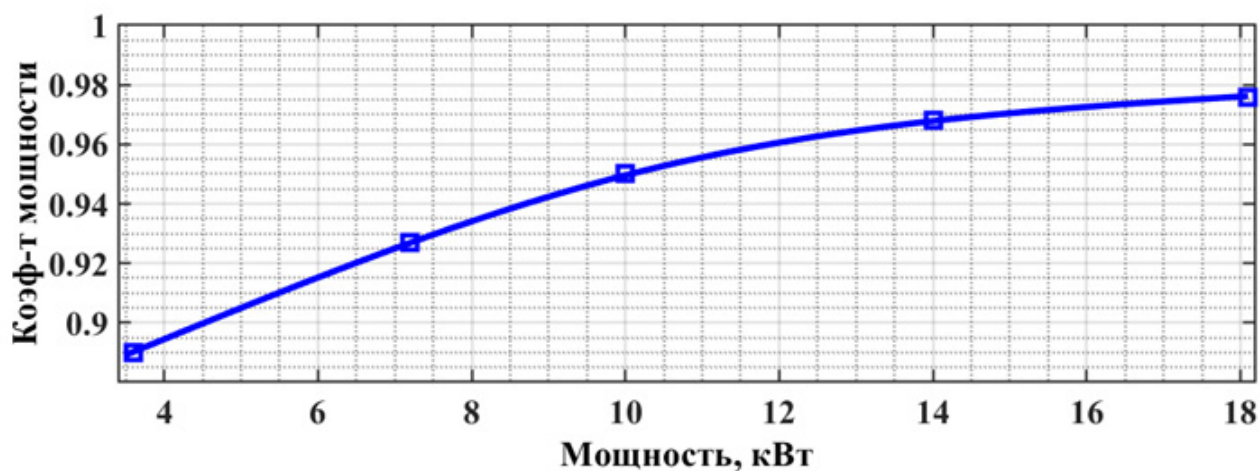
(а)



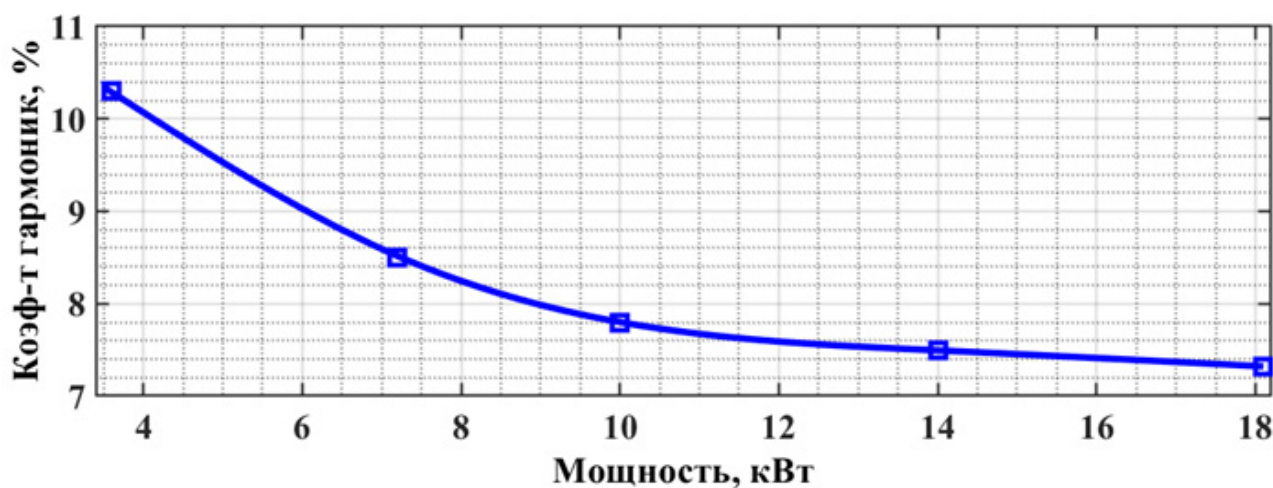
(б)

Рис. 6. Временные диаграммы выходного напряжения, фазных напряжений, фазных токов и тока нейтрали.

По результатам обработки полученных экспериментальных данных при работе экспериментального образца при выходной мощности от 3.5 до 18 кВт были получены зависимости коэффициента мощности и коэффициента гармоник потребляемых фазных токов от выходной мощности, представленные на рисунке 7.



(а)



(б)

Рис. 7. Графики зависимостей показателей качества потребляемой электроэнергии от выходной мощности (а) — коэффициент мощности; (б) — коэффициент гармоник.

### 3. Заключение

В настоящей работе представлена разработка трехфазного управляемого выпрямительного устройства с криогенным охлаждением для работы в перспективной структуре системы электроснабжения на базе ВТСП-устройств. Описаны ключевые этапы разработки: анализ и выбор рациональной топологии силового каскада, имитационное компьютерное моделирование с исследованием параметров модели, а также проектирование конструкции с учетом специфики криогенного охлаждения силовых электронных преобразователей электрической энергии. Экспериментальные исследования прототипа подтвердили его работоспособность в криогенных условиях. Параметры испытанного прототипа близко коррелируют с результатами компьютерного моделирования, что позволяет подтвердить корректность модели. Дальнейшие исследования преобразователя электроэнергии с криогенным охлаждением могут быть проведены в составе демонстратора перспективной системы электроснабжения при первичном питании от магнитоэлектрического генератора с ВТСП обмоткой якоря.

**Литература**

- [1] D. Dezhin, N. Ivanov, K. Kovalev, I. Kobzeva, V. Semenihih, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28**, 125993 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2017.2787180.
- [2] А.В. Левин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалев, А.А. Герасин, С.П. Халютин, *Электрический самолет: концепция и технологии*. Уфа: Уфимск. гос. авиац. Техн.ун-т.-Уфа: УГАТУ, 2014. - 388 с.
- [3] К.Л. Ковалев, В.Т. Пенкин, Н.С. Иванов, Ю.Ю. Некрасова, Р.И. Ильясов, Д.С. Дежин, С.В. Журавлёв, *Электричество* **10**, 45 (2018).
- [4] M. Ostarouch, D. Shishov, D. Shevtsov, S. Zanegin, *Inventions* **7**, 96 (2022). DOI: 10.3390/inventions7040096
- [5] O. M. Mueller, K. G. Herd, Ultra-high efficiency power conversion using cryogenic MOSFETs and HT-superconductors // *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialist Conference - PESC '93*, Seattle, WA, USA, 1993. — pp. 772-778. DOI: 10.1109/PESC.1993.472011
- [6] S. Zanegin, N. Ivanov, V. Zubko, K. Kovalev, A. Alekseev, V. Podguzov, M. Ovdienko, A. Varyukhin, Losses analysis of HTS racetrack coil carrying a distorted sinusoidal current // *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2021. — pp. 297-300. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657338
- [7] W. Song, J. Fang, Z. Jiang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29**, 1 (2019). DOI: 10.1109/TASC.2018.2882066
- [8] V. Madonna, P. Giangrande, M. Galea, *IEEE Transactions on Transportation Electrification* **4**, 646 (2018).
- [9] B. Rahrovi, A Review of the More Electric Aircraft Power Electronics / B. Rahrovi, M. Ehsani // *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2019. – p. 1-6.
- [10] I. Cotton, A. Nelms, M. Husband, *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* **23**, 25 (2008). DOI: 10.1109/MAES.2008.4460728
- [11] J. Devatour, Electrical Generation Trends & Prospective for Next Generation Aircraft / J. Devatour // *MEA 2019 Conference*, February 2019.
- [12] J. W. Kolar, T. Friedli, *IEEE Transactions on Power Electronics* **28**, 176 (2013).
- [13] T. Friedli, M. Hartmann, J. W. Kolar, *IEEE Transactions on Power Electronics* **28**, 176 (2013).
- [14] F. Wang, R. Chen, H. Gui, J. Niu, L. Tolbert, D. Costinett, et al., 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), Indianapolis, IN, USA, 1 (2019). DOI: 10.2514/6.2019-4473
- [15] Vishay. VS-HFA140FA120 – 140 A, 1200 V, Fast Recovery Diode // [www.vishay.com](http://www.vishay.com), 2026. URL: <https://www.vishay.com/docs/94746/vs-hfa140fa120.pdf>

## Three-phase rectifier with cryogenic cooling for prospective superconducting power supply systems

A. O. Alekseev<sup>1,\*</sup>, D. M. Shishov<sup>1</sup>, D. A. Shevtsov<sup>1</sup>, K. L. Kovalev<sup>1</sup>, V. T. Penkin<sup>1</sup>, V. A. Zhukov<sup>1</sup>, N. A. Rodionov<sup>1</sup>, I. V. Lukoshin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute. Volokolamsk highway, 4, 125993, Moscow, Russia

\* e-mail: aleksey.0212@yandex.ru

Power supply systems for the prospective aviation concept of a fully electrified aircraft involve the integrated operation of high-temperature superconducting (HTS) electric machines and cables, as well as power semiconductor energy converters. Contemporary HTS materials fundamentally require cooling to critical temperatures, achieved via cryogenic cooling. In this context, it is expedient to investigate the application of cryogenic cooling for power semiconductor components within the power stages of energy converters. This work focuses on the development of a prototype controlled three-phase rectifier with cryogenic cooling of the power conversion stage. The rectifier is designed as a power factor correction unit to meet aircraft standards for power quality. A comparative analysis of various power conversion stage topologies has been conducted, evaluating the power quality metrics they provide, and a rational topology has been selected for this application. Results from simulation-based computer modeling and experimental studies under cryogenic cooling conditions are presented.

Keywords: high-temperature superconductivity (HTS); cryogenic cooling; cryogenic electronics; prospective aviation power supply system; three-phase rectifier; power factor correction; power stage.



Алексей Олегович Алексеев — аспирант кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Alexey Alekseev — postgraduate student at the Department 310 «Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems» of the Moscow Aviation Institute (National Research University).



Дмитрий Михайлович Шишов — научный сотрудник кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Dmitry Shishov — researcher at the Department 310 «Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems» of the Moscow Aviation Institute (National Research University).



Даниил Андреевич Шевцов — профессор кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Dr. Daniil Shevtsov — professor at the Department 310 «Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems» of the Moscow Aviation Institute (National Research University).



Константин Львович Ковалёв — д. т. н., заведующий лабораторией Объединенного института высоких температур Российской академии наук, заведующий кафедры НИУ МАИ.

Dr. Konstantin L. Kovalev — Head of laboratory, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Moscow Aviation Institute (National Research University).



Владимир Тимофеевич Пенкин — старший научный сотрудник кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Dr. Vladimir Penkin — senior researcher at the Department 310 «Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems» of the Moscow Aviation Institute (National Research University).



Владислав Андреевич Жуков — инженер НИО-310 Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Vladislav Zhukov — engineer at the Department 310 «Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems» of the Moscow Aviation Institute (National Research University).



Никита Альбертович Родионов — инженер 2 категории НИО-205 Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Nikita Rodionov — engineer at the Moscow Aviation Institute (National Research University).



Илья Владимирович Лукошин — аспирант кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Ilya Lukoshin — postgraduate student at the Department 310 «Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems» of the Moscow Aviation Institute (National Research University).